

# 适应宽电压输入的两级式DC/DC变换器

白敬彩,王国柱,范峥,胡永涛,吴君晓

(河南工学院 电气工程与自动化学院,河南 新乡 453003)

**摘要:**模块化电源要求DC/DC变换器能适应宽范围电压输入,而单级式拓扑往往不能满足要求,为此,研究了一种两级式变换拓扑。该拓扑的第1级为具有宽调节特性的双管Buck/Boost变换器,第2级为具有软开关特性的LLC谐振变换器。分析了两级式变换器的工作原理、设计要点和数字化实现方式,搭建了输出功率为200 W的两级式DC/DC变换器原理样机。实验结果表明,提出的两级式变换拓扑具有输入电压范围宽、整机效率高的特点。

**关键词:**两级式变换器;软开关;LLC谐振;锁相环

**中图分类号:**TM46

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19590

## Two-stage DC/DC Converter with Wide Voltage Input

BAI Jingcai, WANG Guozhu, FAN Zheng, HU Yongtao, WU Junxiao

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Institute of Technology,  
Xinxiang 453003, Henan, China)

**Abstract:** DC/DC converters which have high conversion efficiency and can work with wide range input are required in the modular power supplies. However, single-stage power topology often fails to meet the above requirements. A two-stage conversion topology was explored. The first stage is a dual switch Buck/Boost circuit with wide regulation, and the second stage is an LLC resonant converter with soft-switching characteristics. Firstly, the working principle, design points and digital implementation of two-stage converter were analyzed. Then, a prototype of the two-stage DC/DC converter with an output power of 200 W was built. The experimental results reveal that the two-stage DC/DC topology proposed can adapt to a wide input voltage range with high overall machine efficiency.

**Key words:** two-stage DC/DC converter; soft switching; LLC resonant; phase locked loop(PLL)

随着电力电子技术的发展、新型功率器件的应用及封装技术水平的提高,开关电源的小型化、模块化和标准化成为电力电子技术新的发展方向。目前,模块化电源在航天、航空、船舶及汽车工业的应用越来越广泛,对模块化电源的要求也提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。除了高效率变换和高功率密度外,同时也要求模块化电源要能适应宽范围的电压输入。而目前较为成熟的模块化电源的拓扑大都是单级拓扑<sup>[1-2]</sup>,其优点是功率转换效率较高,但是适应输入电压的范围有限。单级式DC/DC拓扑大多是硬开关工作方式,工作频率不能进一步提高,难以满足模块化电源对小型化的要求。

谐振变换技术能够实现功率器件的软开关,

开关损耗很低,因此可提高工作频率。由于LLC谐振变换器能够实现初级的零电压开通(zero voltage switching, ZVS)和次级的零电流开关(zero current switching, ZCS),在保证效率的情况下,能够明显提高开关频率,从而实现模块化电源的小型化设计<sup>[4-5]</sup>。文献[5]提出了基于LLC谐振变换器的模块化电源设计方法。但是,当LLC谐振变换器的输入电压变化范围较大时,需要较大的频率范围才能实现宽电压的调节,这样不仅不利于磁性元器件的设计,而且偏离谐振频率时,LLC谐振变换器不能具有软开关的特点。两级功率拓扑能够更好地解决宽电压输入及高效率隔离的问题,成为模块电源设计的研究热点

**基金项目:**河南省重点科技攻关项目(182102210033, 182102210261);河南省高等学校重点科研资助项目(19B460001)

**作者简介:**白敬彩(1979—),女,硕士,讲师,Email:okbjc@163.com

之一<sup>[6-8]</sup>。文献[9]研究了Buck与LLC级联的变换器,使用Buck变换器电感电流和LLC变换器输出电压反馈的双环定频控制策略,以便通过LLC变换器效率的提升补偿前级Buck变换器带来的效率下降。文献[10-11]提出了一种Boost型宽输入范围的LLC谐振变换器,通过集成2个交错并联的Boost电感,拓宽LLC变换器的增益范围,同时减小输入电流的纹波。文献[12]对适用于宽电压输入的两级式拓扑进行了分析,提出了两级式拓扑的基本设计方法。文献[13]提出了一种双输出的LLC两级式DC/DC变换拓扑,能够适应宽电压的输入特性,而且具有较高的转换效率。但是LLC谐振变换器为定频工作方式,当负载变化较大时容易失去软开关工作点。

综上所述,基于硬开关的功率拓扑技术成熟,转换效率高,但是不能有效提高开关频率,不能满足模块化电源小型化设计的要求。谐振变换器具有软开关特性,但是不能适应宽电压输入的要求。两级式功率拓扑是较好的解决方案。但是,两级式拓扑也有许多需要解决的问题,如电路设计、功率调制方式和控制策略等。本文针对模块化电源对宽范围输入电压和高效率转换的要求研究了一种Buck/Boost与LLC谐振变换器串联的两级式功率拓扑,结合了Buck/Boost宽电压范围的优点和LLC高效率的优点。同时,本文提出了锁相环控制的方式用于LLC谐振变换器的功率控制,与传统定频控制方式<sup>[10-11]</sup>比较,在负载大范围变化时也能实现变换器的ZVS。首先,分析了两级式功率拓扑的工作原理及控制策略,并对设计要点进行了说明;最后,搭建了200 W的原理样机,实验验证了本文提出的两级式功率拓扑的优点。

## 1 两级式功率拓扑

### 1.1 变换器构成

两级式功率拓扑如图1所示,为Buck/Boost电路与LLC谐振变换器的串联组成。前级采用Buck/Boost变换器,具有结构简单、电压应力低、导通损耗小等特点。Buck/Boost为双管升降压电路,不仅具有升降压的功能,还具有功率器件电压应力低、无源元件少以及输入输出极性相同等优点,适用于输入输出电压范围较宽的应用场合。两级式拓扑能实现在不同输入电压状态下可以工作在不同模式,在输入电压高于输出电压

时,调节占空比可以实现降压,为Buck模式;在输入电压低于输出电压时,调节占空比可以实现升压,为Boost模式。因此能够实现变换器宽输入输出电压范围的工作要求。

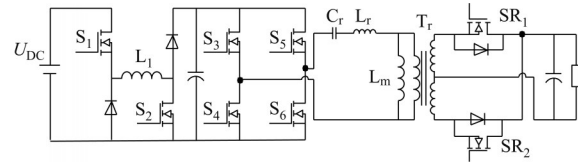


图1 Buck/Boost-LLC 两级式功率拓扑

Fig.1 Topology of two-stage Buck/Boost-LLC converter

两级式DC/DC变换拓扑采用LLC谐振变换器作为第2级变换器,可以实现模块化电压输入端与输出端的隔离。LLC谐振变换器能够实现全范围的软开关,减小了开关管的损耗,提高了变换器的效率。为了进一步减小损耗,在LLC整流电路中,使用了同步整流技术,用MOSFET管代替整流管,实现了高效率转换。

### 1.2 控制策略

两级式功率拓扑输出电压控制的基本思路为:利用Buck/Boost电压调节范围大且具有升降压的功能,对输出电压进行控制;通过LLC对输入和输出进行隔离,以满足模块化电源需要输入和输出隔离的要求。由于LLC谐振变换器不参与电压调节,通过锁相环控制将其锁定在软开关工作点,这样LLC谐振变换器在整个输入电压调节范围都有较高的效率。为进一步提高模块电源的效率,在LLC变换器的输出端使用了同步整流技术。两级式功率拓扑控制框图如图2所示,这是一个典型的双闭环控制系统,内环是锁相环控制,主要用于控制LLC变换器电流和电压的相位角,以保证其始终工作于谐振状态;外环是电压控制,主要用于调节整个电路的输出电压;另外,为了提高效率,在输出端采用了同步整流。具体分析如下:

1) 锁相环控制。实时检测LLC谐振变换器开关网络的输出电压 $u_{inv}$ 和 $i_L$ 的相位角,通过锁相环控制器将开关网络的输出电压和谐振电流的相位角控制为小于 $10^\circ$ 的范围,这样LLC谐振变换器能始终保持软开关工作状态。

2) 输出电压控制。由于Buck/Boost变换器可以工作在升压模式和降压模式,Buck/Boost控制器首先根据输入电压和输出电压的关系判断变换器的工作模式,再通过PI调节器输出占空比 $d$ ,实现对输出电压的控制。

3) 同步整流控制。由于本文设计的模块化

电源的输出电压低、电流大,为提高整流效率,在输出端使用了同步整流技术,用MOSFET代替二极管整流。其工作原理如下:首先,通过电流传感器检测整流桥输出电流,再对检测的电流滤波,后进入超前校正环节以补偿检测信号的延迟;然后,通过零点检测环节将电流信号转换为同频相的方波信号,再驱动同步整流管导通。为避免驱动电路在电流过零点附近多次触发同步整流管,在驱动电路中增加了死区控制。

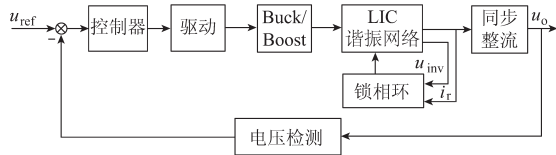


图2 双级DC/DC变换器控制框图  
Fig.2 Control diagram of two-stage DC/DC converter

## 2 变换器设计要点

### 2.1 Buck/Boost双模式控制

双管Buck/Boost电路是Buck变换器和Boost变换器的结合,有双模式和单模式2种工作方式。双模式控制具有转换效率高的优点,本文采用双模式控制。双模式控制等效电路如图3所示。

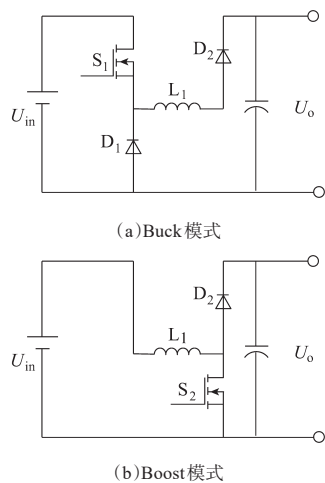


图3 Buck/Boost工作模式  
Fig.3 Operation Mode of Buck/Boost converter

双模式控制策略为:输入电压大于输出电压,即 $U_{in} > U_o$ 时,电路切换到Buck工作模式。此时,开关管 $S_2$ 一直关断, $S_1$ 输出占空比为 $d$ 的PWM波。当 $U_{in} < U_o$ 时,电路切换到Boost模式,此时开关管 $S_1$ 一直开通, $S_2$ 输出占空比为 $d$ 的PWM波。为了实现Buck/Boost电路的模式切换,一般有双调节器和单调节器2种工作方式<sup>[3]</sup>。在双调节器方式下,通过2个调节器分别控制

Buck/Boost电路的2个开关管独立工作,实现输出电压调节。由于双调节器方式是通过判断输入电压的值决定变换器的工作模式,当负载变化时,工作模式分界点会发生变化,这样会影响控制的输出电压的准确性。Buck/Boost电路的第2种控制方法为单调节器方式,它是通过2个相同频率和不同幅值的载波来实现Buck/Boost电路的模式切换的。这种控制方法不需要根据输入电压来切换工作模式,而是由电压调节器的输出信号的大小来确定变换器的工作模式。但是,单调节器工作方式的缺点是当输入电压与输出电压相等和值接近时,控制器会在Buck和Boost工作模式之间频繁切换,带来很大的电磁干扰。

针对以上调节器的缺点并结合数字控制的优势,本文提出了一种Buck/Boost电路的数字控制方式,实现了该电路在升压和降压模式的平滑切换。该数字控制模式的模式切换流程图如图4所示,其工作原理为:在每个开关周期计算输入电压和输出电压差的绝对值,判断其是否小于阈值,如果小于一定阈值则维持原工作模式不变;如果超过阈值,再判断输入与输出电压的大小,若 $U_{in} > U_o$ 则进入降压模式,反之进入升压模式。通过合理设置阈值的大小,可实现升压与降压模式之间的平滑切换。

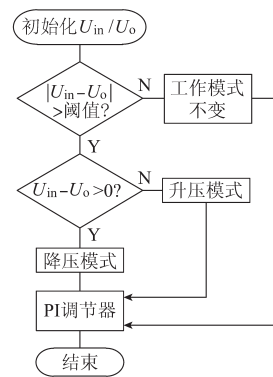


图4 模式切换流程图  
Fig.4 Flowchart of mode switching

### 2.2 LLC谐振变换器

LLC谐振变换器见图1,图中 $S_3 \sim S_6$ 为功率开关管,组成逆变电路, $SR_1 \sim SR_2$ 为同步整流管。谐振电容 $C_r$ 、谐振电感 $L_r$ 和励磁电感 $L_m$ 组成LLC谐振网络。谐振变换器一般采用基波分析法(first harmonic analysis, FHA),假设只有开关频率的基波分量通过谐振网络,因此LLC谐振网络可等效为如图5所示的线性电路。



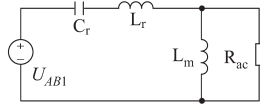


图5 LLC谐振网络基波等效模型

Fig.5 FHA model of LLC resonant converter

定义LLC谐振网络的串联谐振频率如下:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

式中: $f_r$ 为谐振频率; $L_r$ 、 $C_r$ 分别为谐振电感和谐振电容。

根据电路原理,可由图5得到LLC谐振网络的输出电压增益 $M$ 如下<sup>[14]</sup>:

$$M = \frac{nU_o}{U_{in}} = \frac{1}{\sqrt{(f_n - \frac{1}{f_n})^2 Q^2 + (1 + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda f_n^2})}} \quad (2)$$

其中

$$Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{ac}$$

$$f_n = f_s/f_r \quad \lambda = L_m/L_r$$

式中: $Q$ 为品质因数; $f_n$ 为归一化频率; $\lambda$ 为电感比; $f_s$ 为开关频率; $L_m$ 为励磁电感; $L_r$ 为谐振电感。

根据式(2)可得到LLC谐振网络输出电压增益与频率的关系如图6所示。

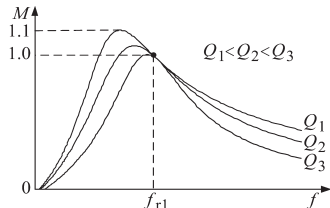


图6 LLC谐振变换器频率特性曲线

Fig.6 Frequency characteristic Curves of LLC resonant converter

由LLC的频率特效曲线可知,当开关频率约等于谐振频率 $f_r$ 时,LLC谐振器的输出电压增益与负荷无关,这是与常规串联谐振变换器相比LLC谐振变换器独特的地方。本文正是利用LLC谐振变换器这个特点,通过锁相环的方式使其工作在谐振频率上,这样LLC的变换效率最高。在该谐振频率点,LLC谐振变换器的输出电压增益为1,再通过改变变压器的变比 $n$ ,将输出电压变换为设计要求的输出电压值。

### 3 数字实现

两级式DC/DC变换器采用数字控制的方式,如图7所示,主要由数字控制器、光耦隔离电路、开关驱动电路、采样电路、保护电路以及两级式DC/DC功率电路组成。数字控制器选用Micro-

chip公司的高性能开关电源数字信号控制芯片,型号为DSPIC30F2020。该控制芯片自带DSP引擎,具有40级桶型移位寄存器,最高工作速度为30 MIPS,能满足两级式变换器系统数据采集和控制算法的要求。DSPIC30F系列芯片主要用于电源控制系统,可支持互补、推挽、移相、电流复位等PWM工作模型。该芯片带有6路周期及占空比均可调的PWM模块,满足两级式DC/DC功率变换器的要求。为提高系统的抗电磁干扰能力,在主电路中设计了光电隔离模块,将功率电路与控制电路进行光电隔离,以增强控制电路的稳定性。同时在系统中设计了过流保护电路以增强其安全性。

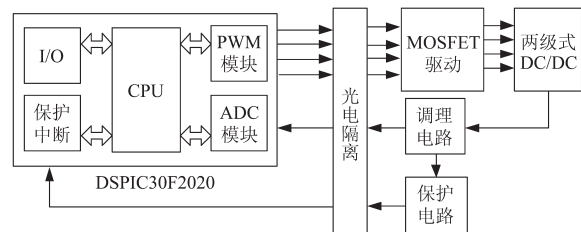


图7 两级式功率拓扑数字控制器框图

Fig.7 Digital controller diagram of two-stage power extension

数字锁相环的数字实现如下:首先检测电流和电压过零点,并计算当前的相位;将当前相位角与参考相位角(一般小于 $10^\circ$ )进行比较;通过数字控制器调节PWM的频率,将相位角始终控制在参考相位角,从而实现对接谐振频率的自动跟踪。同步整流数字实现如下:首先检测整流桥输入端的电流,通过电压比较器检测电流的过零点,在过零点的时刻打开同步整流管的驱动信号,从而实现同步整流管在电流增大时同步开通,实现谐振电路整流桥的同步开通。

### 4 实验验证

为验证两级式DC/DC变换器的工作原理及特效,基于DSPIC30F2020控制芯片,搭建了输出功率200 W的实验平台。输入电压为80~130 V,第1级输出电压为105 V,第2级输出电压为48 V。前级变换器的开关频率为80 kHz,后级LLC变换器的谐振频率为151 kHz,变换器的主要参数为: Buck/Boost电感 $L_r=330 \mu\text{H}$ ,谐振电感 $L_r=22 \mu\text{H}$ ,谐振电容 $C_r=50 \text{nF}$ ,励磁电感 $L_m=100 \mu\text{H}$ ,变压器变比 $n=2.19:1$ 。

图8a为LLC谐振变换器的逆变输出电压和谐振电流的稳态波形。可以看出,谐振电流与逆

变电压为同相位,说明LLC谐振变换器在锁相环的控制下,始终在软开关工作点,谐振变换器具有较高的转换效率;图8b为开关管 $u_{ds}$ 和 $i_{ds}$ 的波形。可以看出,MOSFET在管子电压降为零后导通,实现了ZVS。为验证两级式变换拓扑的宽输入特性,对不同输入电压时的输出特性进行了测试,在不同输入时谐振变换器均能稳定在输出48V。

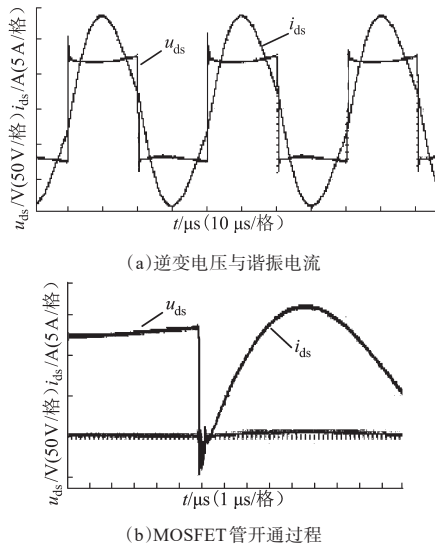


图8 样机波形

Fig.8 Tested waveforms of prototype

图9为在额定负载功率200W的条件下,不同输入电压时整机效率测试曲线。由图9可知,在设计额定输入时,满载输出效率为92%,在全电压输入范围,整机效率大于87%。

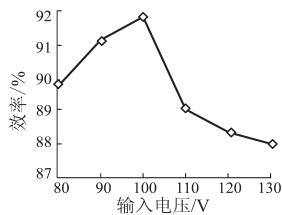


图9 样机效率

Fig.9 Efficiency of prototype

## 5 结论

针对模块化电源对宽输入、高功率密度和高效转换的要求,本文研究了Buck/Boost-LLC两级式DC/DC变换器的特性,提出了LLC采用锁相环的控制方式,以实现变换器在宽负载范围的ZVS,详细分析了其设计要点和数字化控制策略。最后,搭建了基于数字控制器的两级式功率

变换器原理样机,实验结果验证了两级式控制器能够适应宽电压输入和谐振变换器的软开关特性,而且可以保持较高的转换效率。

### 参考文献

- [1] David Cooper. Power Module Integration: a New Approach [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(3):31-36.
- [2] 王泽景,徐怡,龚春英. 固定导通时间控制的多路输出DC/DC电源的研制[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3):17-21,40.
- [3] 郑昕昕,肖岚. 两级宽输入DC/DC变换器设计与建模分析[J]. 电力电子技术, 2012, 46(2):66-68.
- [4] 袁义生,朱本玉,张伟平,等. 一种桥型副边LC谐振变换器及其建模和设计[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(11):63-68.
- [5] Il-Oun lee, Gun-Woo Moon. Analysis and Design of a Three-level LLC Series Resonant Converter for High and Wide-input-voltage Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6):2966-2979.
- [6] 张晋玮,李建兵,周东方. 基于定频控制的对称式倍压整流输出两级式变换器[J]. 电源学报, 2013, 1(1):59-65.
- [7] 王磊,王秋实,赵君君,等. 新能源发电系统用多相耦合交错型双向DC-DC变换器及控制研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(7):41-50.
- [8] 朱元江,王斌. 两级双谐振隔离DC-DC变换器的研究[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(2):117-120.
- [9] 刘闯,张兴,姜天宇,等. Buck-LLC两级DC/DC变换器双环定频控制策略[J]. 电力电子技术, 2017, 51(10):11-13.
- [10] 孙孝峰,申彦峰,朱云娥,等. 一种Boost型宽电压范围输入LLC谐振变换器[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(15):3895-3903.
- [11] Sun Xiaofeng, Shen Yanfeng, Zhu Yune. Interleaved Boost-integrated LLC Resonant Converter with Fix-frequency PWM Control for Renewable Energy [J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2015, 30(8):4312-4326.
- [12] Seungbum Lim, John Ranson, David M. Two-stage Power Conversion Architecture Suitable for Wide Range Input Voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2):805-816.
- [13] Wu Hongfei, Wan Chengan, Sun Kai. A High Step-down Multiple Output Converter with Wide Input Voltage Range Based on Quasi Two-stage Architecture and Dual-output LLC Resonant Converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2015, 30(4):1793-1796.
- [14] 胡亮灯,孙驰,赵治华,等. 高压宽范围输入低电压输出的DC-DC辅助电源设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3):103-114.

收稿日期:2018-10-12

修改稿日期:2019-01-09